第 40 卷 第 3 期
2023 年 6 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 3
Jun. 2023

文章编号:1000-4939(2023)03-0558-13

750 kV 输电导线不均匀覆冰弧垂变化与脱冰跳跃研究

张健[1],张宇卓[2],王金锁[1],褚忠凯[1],孙清[2],周文武[3],江岳[3]

(1. 国网新疆建设分公司,830002 乌鲁木齐;2. 西安交通大学土木工程系,710054 西安;
3. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司,710075 西安)

摘 要:采用有限元方法分析了 750 kV 超高压输电线路不均匀覆冰状态下导线的弧垂变化规律和脱冰跳跃响应规律。建立了"绝缘子串-六分裂导线"模型,对比分析了均匀覆冰、三段覆冰、线性覆冰和高处覆冰等工况下导线弧垂变化形态及其脱冰动力响应,分析了高处覆冰工况下档数、档距、高差、覆冰厚度、脱冰率等因素对导线的形态变化及其脱冰跳跃高度的影响。结果表明,导线的变形和脱冰跳跃高度随着档数、档距、覆冰厚度的增大而增大;中间档高差增大时,导线沿水平方向的偏移增大,而脱冰跳跃高度表现出减小的趋势;在均匀覆冰下中间档档距为 1 000 m 时,导线脱冰跳跃高度出现峰值,为 25.627 m。

关键词:架空输电线路;不均匀覆冰;导线弧垂变化;脱冰跳跃;数值模拟

中图分类号:TM753 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.03.007

Research on uneven iced transmission lines and the dynamic response after ice-shedding

ZHANG Jian[1],ZHANG Yuzhuo[2],WANG Jinsuo[1],CHU Zhongkai[1],SUN Qing[2],ZHOU Wenwu[3],JIANG Yue[3]

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Corporation,830002 Urumqi,China;2. Department of Civil Engineering,
Xian University,710054 Xi'an,China;3. Northwest Electric Power Design Institute CO,
Ltd. of China Power Engineering Consulting Group,710075 Xi'an,China)

Abstract:The finite element method is used to analyze the deformation law and ice-shedding dynamic response law of 750 kV EHV transmission line under uneven icing condition. The model of "insulator string six bundle conductor" is established,and the conductor shape and its ice-shedding dynamic response under uniform icing,three section icing,linear icing and high altitude icing are compared and analyzed. The influences of span number,span length,height difference,icing thickness and ice-shedding rate on the shape change and ice-shedding jump height of conductors under high altitude icing conditions are mainly discussed. The results show that the conductor deformation and ice-shedding jump height increase with the increase of span number,span length and icing thickness. When the height difference of the fourth span in-

收稿日期:2021-03-26 **修回日期**:2021-07-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51978570);国网新疆电力有限公司科技项目(No. SGXJJS00JS2000044)
通信作者:孙清,教授。E-mail:sunq@mail.xjtu.edu.cn
引用格式:张健,张宇卓,王金锁,等. 750 kV 输电导线不均匀覆冰弧垂变化与脱冰跳跃研究[J]. 应用力学学报,2023,40(3):558-570.
ZHANG Jian,ZHANG Yuzhuo,WANG Jinsuo,et al. Research on uneven iced transmission lines and the dynamic response after ice-shedding [J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(3):558-570.

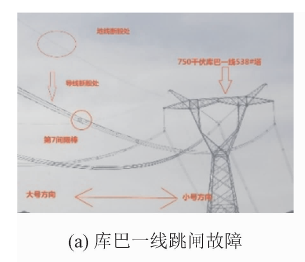
creases, the slip along the horizontal direction of the conductor increases, while the ice-shedding jump height decreases. When the fourth span is 1 000 m under uniform icing, the ice shedding jump height of the conductor has a peak value, which is 25.627 m. The above research results show that the UHV transmission line is uniformly covered.

Key words: overhead transmission line; uneven icing; conduction sag change; ice-shedding jump; numerical simulation

随着经济的快速发展,社会对电能的需求日益增加,进而对输电线路的安全运行也提出了更高的要求,同时伴随国家西电东送能源战略工程的不断推进,输电线路通常需穿越气候恶劣的山区等[1],由于环境的影响极易在导线及地线上覆冰,使导地线覆冰后变形不一致,导致电气安全间隙不足,诱发放电跳闸事故。

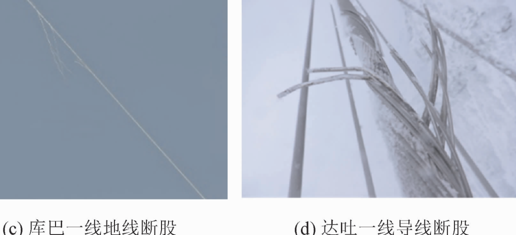
近几年,我国输电线路由于导地线不均匀覆冰引起的跳闸事故频发,严重威胁电力系统的安全运行。2014 年 11 月新疆 750 kV 库巴一线在极端天气下造成导地线严重覆冰,覆冰厚度超过设计覆冰厚度,导致地线与 A 相导线安全距离不足,引起线路跳闸,地线断股;2015 年 11 月新疆 750 kV 达吐一线由于地线的不均匀覆冰导致导地线间距不足,引起跳闸事故;2016 年 11 月新疆 750 kV 乌达一线由于地线的不均匀覆冰,导致地线弧垂最低点向较高挂点一侧铁塔偏移,从而导致距较高挂点一侧铁塔约 180 m 处导、地线之间电气安全间隙不足,引起放电跳闸;2018 年 3 月新疆 750 kV 伊苏线在导、地线覆冰厚度 20 mm 时,发生脱冰跳跃,导致导线对地线的净空距离小于规范要求的电气安全间隙值,引起导线对地线放电而跳闸[2]。图 1 为新疆近几年因为导地线不均匀覆冰、脱冰跳跃而引发的事故,这些事故对当地人民的生活及生产造成重大威胁、严重影响当地经济的发展。

国内外学者对输电线路覆冰和脱冰做过一系列研究。JAMALEDDINE 等[3]搭建了两档输电线路的缩尺模型,进行了多种脱冰工况的模拟,测量了架空线的最大跳跃高度以及各个挂点的张力变化情况;李宏男等[4]对 50 m 孤立档导线进行脱冰试验,测量不同冰厚、脱冰率、脱冰位置等工况下导线端部张力和档距跨中的跳跃高度;MENG 等[5]通过建立全尺寸多跨结构进行脱冰试验,将试验结果与数值模拟结果进行对比分析,研究了导线脱冰跳跃规律;杜志叶等[6]建立塔线耦合模型研究了不同覆冰厚度、风速等作用下塔线系统的失效情况;薛凯允[7]基于 ABAQUS 有限元软件,采用改变密度法对输电塔体系在不同脱冰位置、脱冰顺序以及脱冰率下的变化规律进行研究;ROSHAN FEKR 等[8]讨论了档距、中心支撑高度档数等一些参数对脱冰动力响应的影响,结果表明导线的最大张力应考虑档数的影响;董永星等[9]为研究分裂导线不同步脱冰时各子导线的动力响应,利用 ADINA 软件建立了六分裂导线-间隔棒体系的有限元模型,分析了分裂导线不同步脱冰对子导线的脱冰跳跃高度、导线张力等的影响;陈科全等[10-11]采用 ABAQUS 软件建立了 500 kV 超高压耐张线路段有限元模型,并进行了不同脱冰工况下线路的动力响应分析;ROSHAN FEKR 等[12]建立有限元模型研究了覆冰厚度和脱冰位置等因素对单根输电导线脱冰动力响应的影响。



(a) 库巴一线跳闸故障　　(b) 库巴一线A相导线放电点

(c) 库巴一线地线断股　　(d) 达吐一线导线断股



(e) 伊苏线放电间隙灼烧

图 1　新疆地区近几年覆冰事故

Fig. 1　Ice accidents of Xinjiang in recent years

从上述研究可以看出,目前研究大多集中于中小档距输电塔线的覆冰以及脱冰跳跃,对于导地线

在大档距、大高差和不均匀覆冰工况下的变形规律和脱冰动力响应研究相对较少,而覆冰事故频发也暴露出目前线路的抗冰设计难以满足实际情况。因此,研究不同覆冰形式下导地线的变形特性和脱冰动力响应,从而确保导线、地线在覆冰与脱冰时,各相导地线之间的电气安全间隙满足要求,对覆冰区线路的设计和安全运行具有重要的意义。

本研究采用有限元方法建立了连续档导线有限元模型,分析了覆冰形式、档数、档距、高差和覆冰厚度等因素对导线的覆冰形态及其脱冰后动力响应的影响,归纳导线覆冰形态变化及其脱冰后动力响应的规律,为高压输电塔线体系防灾设计提供参考。

1 计算模型及荷载

以新疆乌达一、二线 750 kV 输电线工程为背景,利用 ANSYS 软件,建立 6 塔 7 线有限元模型。其中第四档,即中间档的档距和高差分别为 800 m 和 80 m,其余档的档距和高差分别为 400 m 和 0 m,研究导线在均匀覆冰、三段覆冰、线性覆冰和高处覆冰 4 种覆冰工况下的形态变化规律,确定最不利的覆冰工况,并研究中间档导线在最不利覆冰工况下导线覆冰后的变形规律和脱冰跳跃高度变化规律。

1.1 有限元模型

输电铁塔为 ZGU430S 双回路杆塔,塔高为 78.5 m;塔身所用钢材为 Q235、Q345、Q420,有限元模拟时采用可以承受轴向力、弯矩、扭转的 BEAM 梁单元和只承受轴向力的 LINK 杆单元模拟输电塔的不同受力特性的构件。

导线采用 6 × LGJ-400/50 钢芯铝绞线,分裂间距 400 mm,正六边形布置,导线的设计参数如表 1 所示。考虑到输电线属于只承受轴向张力,不能承受压力及弯矩的理想柔性结构,ANSYS 中 LINK10 单元仅能单向受力,即仅受压或受拉,且支持大变形效应,因此可以模拟柔性导线,建模时依据悬链线方程进行找形分析,且每 1 m 划分为一个单元,即 800 m档距的导线实现了 800 个单元的网格划分,具有较高的精度和较高的计算效率。

实际线路中的绝缘子串和间隔棒结构较为复杂,根据以往研究,将绝缘子串及线夹简化为如图 2(a)所示[13-14],间隔棒简化为六边形结构[9,14],分裂导线在服役过程中容易发生大变形和大转角,因此分裂导线中的间隔棒和线夹通常采用考虑大转动的空间梁单元模拟[15-16],绝缘子串的设计参数如表 2,间隔棒的设计参数如表 3,均采用 BEAM188 单元模拟。将间隔棒和线夹的空间梁单元模型进行自由度缩减使之与导线 LINK 单元实现有效组合,间隔棒安装间距根据实际工程取 50 m,绝缘子串和间隔棒均根据有限元模型和实际质量相等的原则计算其等效密度。绝缘子串及间隔棒有限元模型分别如图 2(a)和图2(b)所示,其中悬垂串总长度为 9.036 m。

表 1 导线的型号及设计参数

Tab. 1 Model and design parameters of conductor

参数	导线
型号	LGJ-400/50
面积/mm^2	599.59
弹性模量/Pa	6.9×10^{10}
泊松比	0.3
单位长度重量/(kg · km^{-1})	2 520.055
外径/mm	27.63

表 2 绝缘子串的设计参数

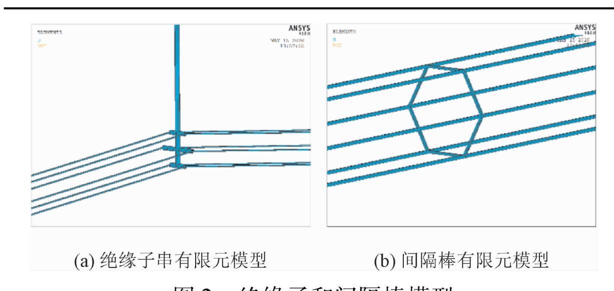
Tab. 2 Design parameters of insulator string

构件	单元类型	截面面积/m^2	弹性模量/Pa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	总质量/kg
绝缘子串	BEAM188	0.007 85	1×10^{11}	0.3	4 760	347.4
线夹	BEAM188	0.007 85	2×10^{11}	0.3	4 760	

表 3 间隔棒的设计参数

Tab. 3 Design parameters of spacer

构件	单元类型	弹性模量/Pa	截面面积/m^2	泊松比	长度/mm	密度/(kg·m^{-3})
间隔棒	BEAM188	2.06×10^{11}	0.000 4	0.3	400	7 850



(a) 绝缘子串有限元模型 (b) 间隔棒有限元模型

图 2 绝缘子和间隔棒模型

Fig. 2 Insulator and spacer rod model

目前研究结果表明,输电塔对导线脱冰跳跃的高度影响较小[17],因此本研究计算时忽略输电塔变形的影响,计算时采用如图 3 所示的连续 7 档"绝缘子串-六分裂导线"有限元模型,根据实际工程中绝

缘子串与输电塔连接处为铰接，绝缘子串在荷载的作用下可以有顺导线方向或垂直于导线方向的偏转，将模型的边界条件设为各悬垂串上端节点均约束 3 个平动自由度，而不限制转动自由度；连续档导线两端与耐张塔连接处节点为固接限制全部自由度。

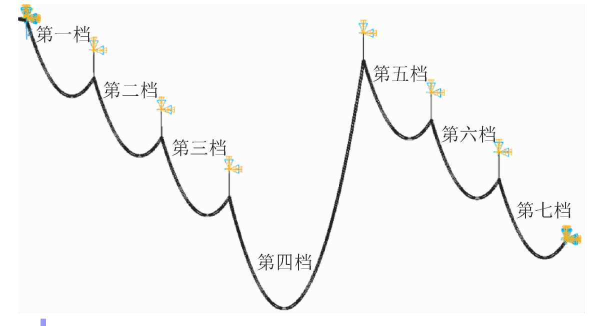


图 3　七档六分裂导线有限元模型

Fig. 3　Finite element model of seven-span six-bundle conductor

1.2　荷载模拟

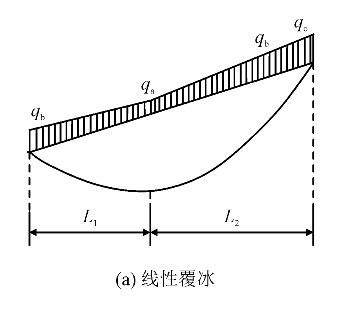
目前，模拟输电线路覆冰的方法主要有 3 种：附加力模拟法、改变密度法以及附加冰单元法[18-21]。本研究通过在节点处施加等效集中荷载模拟覆冰，即使用附加力模拟法模拟输电线路覆冰。模型中每 1 米划分为 1 个单元，每间隔 1 m 施加对应覆冰厚度下导地线单位长度覆冰重量的荷载，根据以往研究，在使用附加力模拟法模拟覆冰时，集中力个数应在 20 个以上[22]才可使模拟准确，本研究的集中力个数与档距相同远大于 20 个，故可保证模拟的准确性。

导地线的覆冰由于受自然环境和线路走向影响，可能呈现出不同的截断面，我国高压送电线路设计手册的覆冰截面为环形截面，并且大多学者通常采用环形截面假设进行研究[23-24]，因此本研究也将覆冰截面假设为环形截面，等效冰荷载的计算公式为

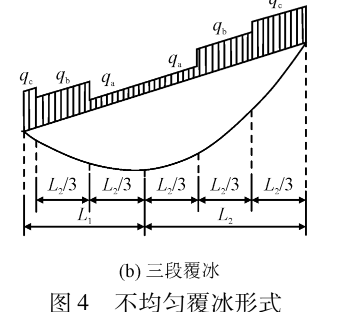
$$F = \frac{\rho \pi g_{\mathrm{b}}}{4}[(D+2b)^2 - D^2] \tag{1}$$

其中：b 为覆冰厚度，m；D 为架空线的外径，m；F 为导地线单位长度覆冰重量，N/m；$\rho = 900\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$；$g_{\mathrm{b}} = 9.8\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$。

对乌达一线近年发生的跳闸故障事故进行分析，表明事故发生的区域为大档距、大高差区域，最大档距为 1 116 m，最大高差约为 195 m，且事故现场发现较高塔位附近的覆冰情况更为严重，即高悬挂点处的覆冰厚度更大，不均匀覆冰特征明显[2]。由于空气中液态水含量随高度的增加而升高，电线悬挂点越高，雾凇越严重，即高悬挂端覆冰严重，低悬挂端覆冰较轻或未覆冰，尤其是在爬坡的山地地段。为模拟实际情况下的不均匀覆冰形式，本研究根据覆冰厚度随着海拔高度的增加逐渐增加的原则，设计了 3 种不同的不均匀覆冰形式：三段覆冰、线性覆冰、高处覆冰，分别考虑了冰荷载的突变、线性变化和部分覆冰 3 种情况，并与均匀覆冰工况进行对比分析，着重研究大档距、大高差的导线在不均匀覆冰工况下的形态变化规律以及不同工况下导线脱冰跳跃高度的变化规律。3 种不均匀覆冰形式如图 4 所示，其中 L_1 为低挂点至弧垂最低点的距离，L_2 为弧垂最低点至高挂点的距离。



(a) 线性覆冰



(b) 三段覆冰

q　L_1　L_2

(c) 高处覆冰

图 4　不均匀覆冰形式

Fig. 4　Pattern of uneven icing

根据《110 kV-750 kV 架空输电线路设计规范》（GB 50545-2010）要求，轻冰区覆冰厚度宜按 5 mm 或 10 mm 覆冰厚度设计，中冰区覆冰厚度宜按 15 mm 或 20 mm 覆冰厚度设计，故本研究取均匀覆冰厚度为 15 mm；线性覆冰时覆冰厚度呈线性增加，导线上同一高度的点的覆冰厚度相同，平均覆冰厚度为 15 mm；三段覆冰时覆冰荷载有突变，将 L_2 均分为 3 段，同一海拔高度下覆冰厚度相同，覆冰厚度取平均覆冰厚度为 15 mm；高处覆冰时覆冰荷载仅在高挂点一侧施加，覆冰长度以对应档距和高差下使导线偏移最大的为准，根据试算结果取从高挂点起 300 m 覆冰，其余部分不覆冰，覆冰厚度为 15 mm。其中，三段覆冰和线性覆冰的最大和最小覆冰厚度分别取 10 mm 和 20 mm。按照如上所述规则，确定

不同节点处的覆冰厚度,利用式(1)计算施加在节点处的荷载大小,实现不均匀覆冰形式的荷载模拟。

脱冰采用矩形脉冲荷载模拟,通过改变施加在模型节点上的力,利用 ANSYS 软件进行瞬态动力分析,以模拟输电线路的脱冰动力响应。

1.3 模型验证

为验证本研究建模方法的可靠性,利用现有脱冰模拟试验[4]来验证输电线模型和脱冰模拟技术,如图5所示为跨度50 m的单档导线覆冰示意图。文献[4]在实验室中建立了跨度50 m的单档输电线模型,导线使用 LGJ-25/4 型号,导线直径为6.96 mm,计算截面积为29.59 mm^2,单位导线的质量为0.102 6 kg/m,弹性模量为79 000 N/mm^2。覆冰的质量由沿该导线均匀放置的沙袋来实现,脱冰则通过断开沙袋来实现。本研究使用文献中覆冰厚度为导线直径的1.0倍,即覆冰厚度为6.96 mm时不同工况下的试验结果验证本研究的模拟方法。

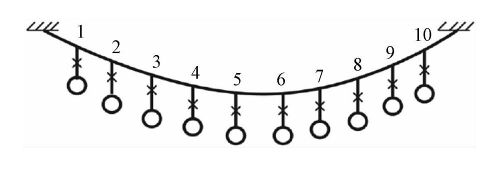


图5 单档导线脱冰试验[4]

Fig.5 Ice-shedding tests of single span[4]

利用本研究中相同的建模技术,建立文献[4]中单档导线脱冰试验模型,计算了导线3~7位置覆冰脱落(工况1)、导线1~10位置覆冰脱落(工况2)、导线1~5位置覆冰脱落(工况3)3种工况下跨中最大跳跃高度的数值结果,与试验结果对比如表4所示,数值模拟的结果均稍微大于试验所测量的结果,因为数值模拟是对试验进行了一定程度上的简化。文献[4]中试验的结果和其数值模拟的结果比较最大的误差为7.9%,由表4可以看到数值结果与试验结果的最大误差为7.49%,因此亦可说明两者吻合良好,故本研究所使用的有限元建模方法是可靠的。

表4 跨中最大跳跃高度数值结果与试验结果对比

Tab.4 Comparison of jumping heights

工况	数值结果/mm	试验结果[4]/mm	相对误差/%
1	379.94	356.90	+6.46
2	143.02	133.06	+7.49
3	165.91	155.62	+6.61

2 不均匀覆冰形式下导线弧垂变化分析

为明确导地线间距的变化规律,计算中间档导地线分别采用如图4所示3种形式的不均匀覆冰和均匀覆冰,其余档均不覆冰时的导地线覆冰形态图,如图6所示,其中地线使用 JLB20A-120 型号参数建模。从图中可得,档距为800 m时,覆冰后在距高挂点0~250 m范围内导线和地线二者间距最小,未在档距中央的位置。

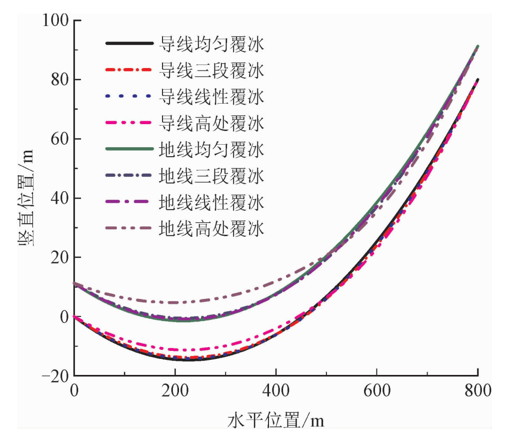


图6 不同覆冰形式下导线和地线的形态

Fig.6 Shape of conductors and ground wires under different icing forms

由图6可以看出,均匀覆冰、三段覆冰、线性覆冰3种整档全覆冰形式下,导线和地线的弧垂变化趋势一致,弧垂间隙最小值满足设计的安全要求。高处覆冰工况下,导线、地线弧垂最低点向较高悬挂点方向发生明显偏移,且明显大于均匀覆冰工况下导线的水平位移,与其他覆冰形式下的变化趋势不一致,在覆冰荷载较大时极易在高挂点附近出现导地线间距不足的情况。地线和导线仅是输电线的截面积、弹性模量等不同,在不同影响因素下两者的变化规律一致,因此本研究重点研究高处覆冰工况下各因素对覆冰后导线形态变化的影响规律,其结论可以推广至地线。

2.1 档数的影响

本研究给出高处覆冰工况下,档数分别为1、3、5、7档时,导线各点覆冰后位置的变化情况。计算时覆冰长度均取弧垂最低点到高挂点之间距离的一半,即覆冰长度为300 m。图7为不同档数时,覆冰后中间档导线各点沿导线方向水平位移及竖直位移

的分布情况。档距为 1、3、5、7 档时，中间档分别指第 1、2、3、4 档。图 7(a)纵坐标为正时表示位移向高挂点方向偏移，为负时表示位移向低挂点方向偏移；图 7(b)纵坐标为正时表示位移向下，为负时表示位移向上。

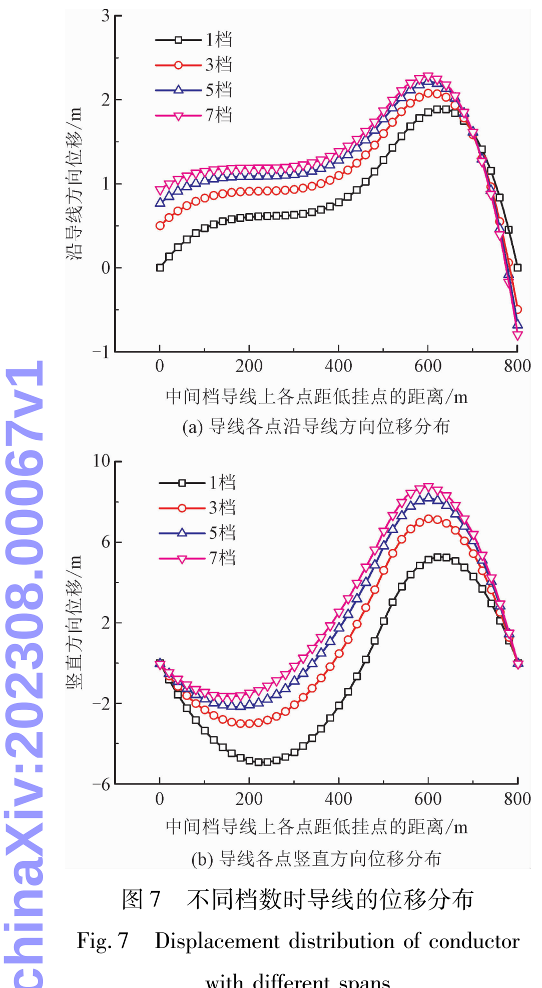


图 7　不同档数时导线的位移分布

Fig. 7　Displacement distribution of conductor with different spans

从图 7(a)可知，高处覆冰作用下导线产生较大的沿导线方向的水平位移，导线向高挂点偏移，随着档数的增加，水平位移值增大；由图 7(b)可知，导线上靠近高挂点一侧的竖直位移向下，靠近低挂点一侧的竖直位移向上，在高挂点附近容易发生事故，因此重点关注高挂点附近导线竖直位移向下的情况，随着档数的增多，导线向下的位移值增大。导线向高挂点一侧和竖直向下的位移均在距高挂点 200 m 附近时向下的位移最大。7 档时中间档导线的水平位移和向下位移均最大，分别为 2.29、8.78 m。

计算结果表明，随着档数的增多，导线向高挂点一侧和向下的位移均增大，这是由于在覆冰荷载作用下引起两侧各绝缘子的偏转，档数越多累积到中间档导线的水平方向和竖直方向的偏移越大。

2.2　档距的影响

计算不同档距时高处覆冰工况下中间档导线各点的位移。计算工况如表 5 所示，高差为中间档 80 m，其余档 0 m；工况 1、2、3、4、5 分析中间档档距变化对导线弧垂分布的影响，工况 3、6、7、8 分析两侧档的档距变化对中间档导线弧垂分布的影响。图 8 和图 9 分别为导线上各点位移分布随中间档档距和随两侧档档距的变化情况。

表 5　档距对导线覆冰形态影响计算工况

Tab. 5　Calculation conditions of influence of span length on conductor icing form

工况	1	2	3	4	5	6	7	8
档距 X/m	400	600	800	1 000	1 200	800	800	800
档距 Y/m	400	400	400	400	400	600	800	1 000

注：X 为中间档档距；Y 为两侧档档距；工况 3 为初始计算模型。

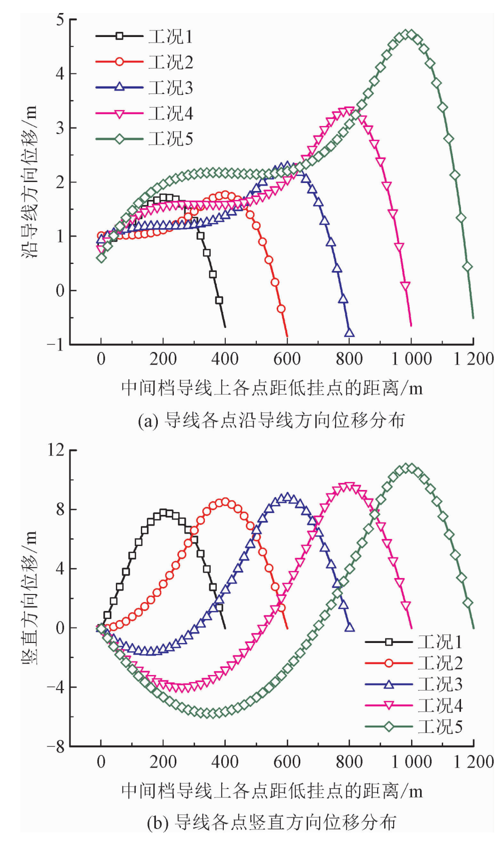


图 8　中间档档距变化时导线的位移分布

Fig. 8　Displacement distribution of conductor with different fourth span

从图 8(a)可以看出，随着中间档档距增大，导线水平位移最大值明显增大，不同档距下水平位移最大值位于距高挂点 200 m 处。由图 8(b)可知，中间档档距为 400 m 和 600 m 时，导线仅有向下位移，

档距大于等于 800 m 时,靠近高挂点一侧的竖直位移向下,靠近低挂点一侧的竖直位移向上;随着中间档档距增大,竖直向下的位移值增大,在距高挂点 200 m 附近时向下位移最大。中间档档距为 1 200 m 时,导线的水平位移和向下位移均最大,分别为 4.73、10.79 m。

分析出现上述规律的原因,中间档档距增大,导线的张力减小,即导线的弛度增大,且覆冰长度均为 300 m 时中间档档距越大,不均匀覆冰的特征越明显,因此,导线的纵向及竖直位移与中间档档距成正比。

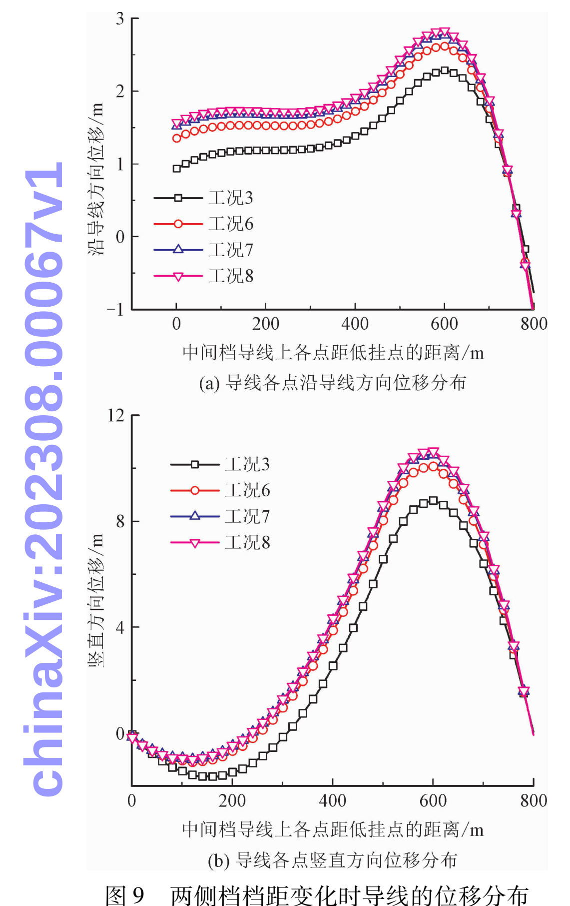


图 9 两侧档档距变化时导线的位移分布

Fig. 9 Displacement distribution of conductor with different both sides span

由图 9(a)可以看出,随着两侧档档距增大,导线的水平位移增大,最大水平位移出现在距高挂点 200 m 附近;由图 9(b)可知,随着两侧档档距增大,导线向下的位移值增大,总体向下移动,在距高挂点 200 m 附近向下位移出现最大值。从图 9 可以看出,当两侧档档距大于 800 m 时,两侧档档距的增大对中间档导线覆冰后的位移分布影响较小,可以认为,当两侧档档距与中间档档距相同时,导线出现最大的水平和竖直方向位移。两侧档档距为 1 000 m 时,导线的水平位移和向下位移均最大,分别为 2.83、10.66 m。导线的纵向及竖直位移均与两侧档档距成正比,但两侧档档距增大时导线位移的增大幅度小于中间档档距增大时导线位移的增大幅度。

2.3 高差的影响

本节给出不同高差时,高处覆冰工况下中间档导线各点的位移。计算工况如表 6 所示,档距为中间档 800 m,其余档 400 m;工况 1、2、3、4、5、6 研究中间档高差变化对导线弧垂分布的影响;工况 2、7、8、9 研究两侧档高差变化对中间档的导线弧垂分布的影响。图 10 和图 11 分别为导线上各点位移分布随中间档高差和随两侧档高差的变化情况。

表 6 高差对导线覆冰形态影响的计算工况

Tab. 6 Calculation conditions of influence of elevation difference on conductor icing form

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9
高差 G/m	0	0	0	0	0	0	50	80	110
高差 H/m	50	80	110	140	170	200	80	80	80

注:G 为两侧档高差;H 为中间档高差;工况 2 为初始计算模型。

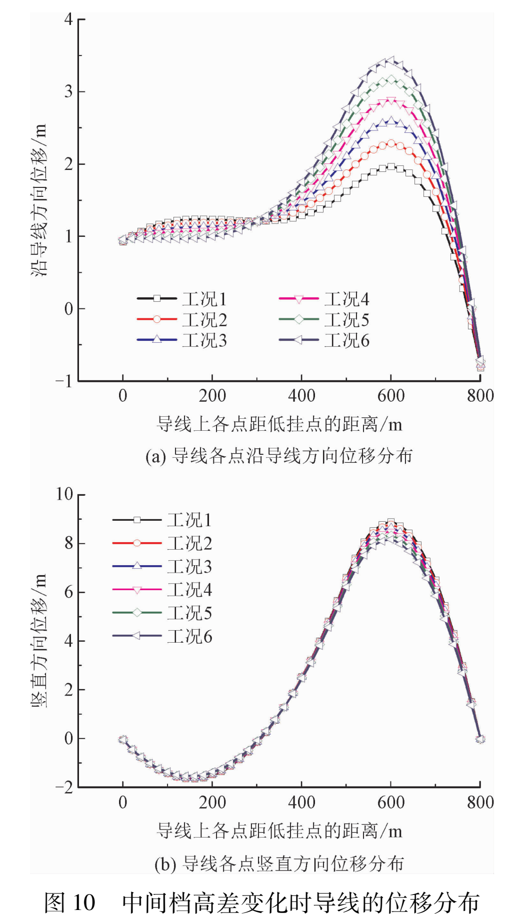


图 10 中间档高差变化时导线的位移分布

Fig. 10 Displacement distribution of conductor with different elevation difference of the fourth span

从图 10(a)可知,随着中间档高差的增大,导线的水平位移值增大,均在距高挂点 200 m 附近时水平位移最大,中间档高差为 200 m 时,水平位移为 3.429 8 m。由图 10(b)可知,随着中间档高差的增大,导线向下和向上的位移值均减小,且变化幅度很小,在距高挂点 200 m 附近时向下位移最大,中间档高差为 50 m 时向下位移为 8.896 m,中间档高差的增大对导线竖直方向位移的影响很小。中间档高差增大,导线的垂度减小,且覆冰长度均为 300 m 时中间档高差越大,高处覆冰引起的偏移现象逐渐增强,因此,导线的纵向位移与中间档高差成正比,导线的竖直位移与中间档高差成反比,中间档高差的变化对导线竖直方向位移的影响很小。

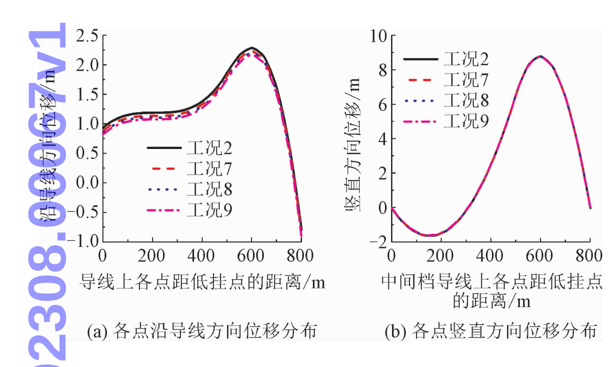


图 11　两侧档高差变化时导线的位移分布

Fig. 11　Displacement distribution of conductor with different elevation difference of both sides

由图 11(a)可知,随着两侧高差的增大,中间档导线的最大水平位移值有所减小,但幅度很小,水平位移最大为 2.284 5 m;由图 11(b)可得,两侧高差的变化对中间档导线的竖直方向位移分布几乎无影响,4 条曲线基本重合。可以认为两侧档高差变化对中间档导线的弧垂分布影响很小。

2.4　覆冰厚度的影响

计算高处覆冰覆冰厚度分别为 10、15、20、25、30 mm 时,导线各点覆冰后位置变化情况。图 12 为导线上各点位移分布随覆冰厚度的变化情况。

由图 12 可知,覆冰厚度的增加对导线纵向、竖直方向位移值有影响,随着覆冰厚度增大,导线的两个方向的位移值均呈现出增大的趋势,这是因为覆冰厚度增大作用于导线上的荷载增大,两个方向位移值均在距高挂点 200 m 附近时最大。覆冰厚度为 30 mm 时,导线的水平位移和向下位移均最大,分别为 4.56、16.50 m。

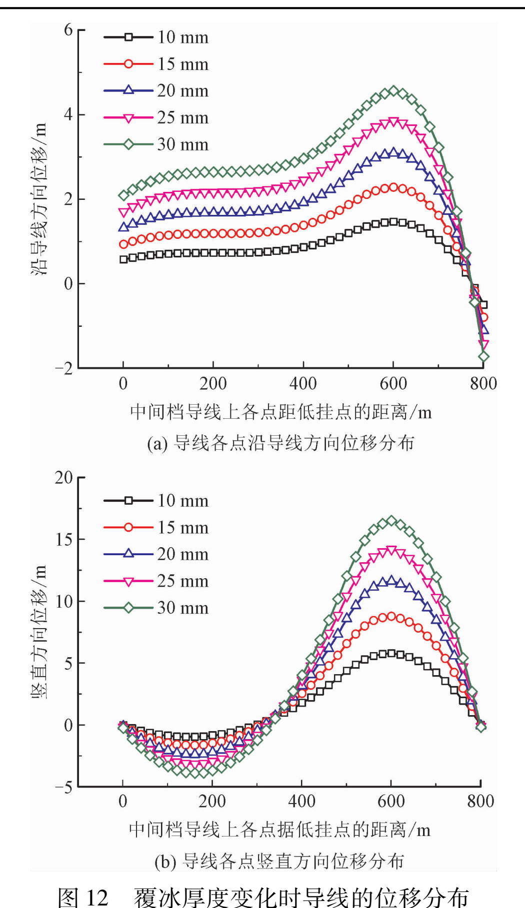


图 12　覆冰厚度变化时导线的位移分布

Fig. 12　Displacement distribution of conductor with varying ice thickness

3　导线脱冰动力分析

目前研究表明,连续档导线各档都覆冰,仅中间一档发生覆冰脱落时,中间档导线的脱冰跳跃高度较其他工况大,这是因为仅单档脱冰时脱冰档两侧应力差较各档均脱冰时的应力差大,从而导致悬垂绝缘子的偏转角增大,导线的脱冰跳跃高度也增大。因此本研究进行脱冰动力响应分析时,对中间档导线采用不同形式的覆冰,其余档均匀覆冰,研究中间档导线均匀脱冰时档数、档距、高差、覆冰厚度、脱冰率对导线脱冰跳跃高度的影响。

首先确定发生脱冰跳跃时可能会使导地线间距不足的最不利的不均匀覆冰形式,分别通过控制不同覆冰形式下脱冰率相同和脱冰量相同计算。脱冰率相同时取 80% 均匀脱冰;脱冰量相同时取均匀覆冰形式下脱冰 30% 为标准,其他覆冰形式下的脱冰荷载与其相同。图 13 为不同覆冰形式下导线脱冰跳跃高度最大点的位移时程,表 7 为不同覆冰形式下脱冰跳跃高度和跳跃高度最大点距高挂点距离。

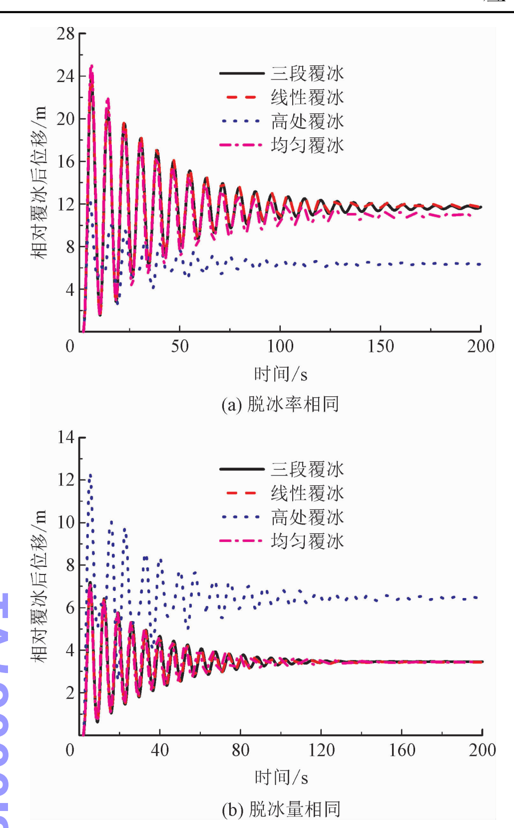


图 13 不同覆冰形式下导线脱冰跳跃最高点位移时程

Fig. 13 The time history curve of the highest point of conductor ice-shedding jump under different icing forms

表 7 不同覆冰形式下冰跳高度和冰跳高度最大点的位置

Tab. 7 Ice-shedding jump height and the position of the maximum jump height with different icing forms

覆冰形式		三段覆冰	线性覆冰	高处覆冰	均匀覆冰
脱冰率相同	跳跃高度/m	23.717	23.983	12.277	25.130
	最大冰跳高度点距高挂点距离/m	344	349	250	400
脱冰量相同	跳跃高度/m	7.190	7.131	12.340	7.145
	最大冰跳高度点距高挂点距离/m	400	400	250	400

结合图 13 和表 7 结果分析可知,脱冰率相同时,均匀覆冰形式下的脱冰跳跃高度最大;高处覆冰时,脱冰跳跃最高点靠近高挂点,其余覆冰形式下,跳跃最高点在跨中附近,且脱冰量相同时,高处覆冰形式下的脱冰跳跃高度最大。对比导线覆冰后形态可知,高处覆冰下由导地线间隙不足引起的线路跳闸放电的事故更容易发生,因此本研究针对均匀覆冰和高处覆冰两种覆冰形式下的均匀脱冰响应进行分析,除研究脱冰率对导线脱冰动力响应的影响外,其余计算脱冰率均取 80%。

3.1 档数的影响

计算均匀覆冰和高处覆冰工况时,档数分别取 1、3、5、7 档时,分析导线的脱冰动力响应。图 14 为两种覆冰形式下中间档导线脱冰跳跃最高点的位移时程;图 15 为两种覆冰形式下中间档脱冰后导线的冰跳高度随档数的变化情况。表 8 给出了高处覆冰时冰跳高度最大点位置。

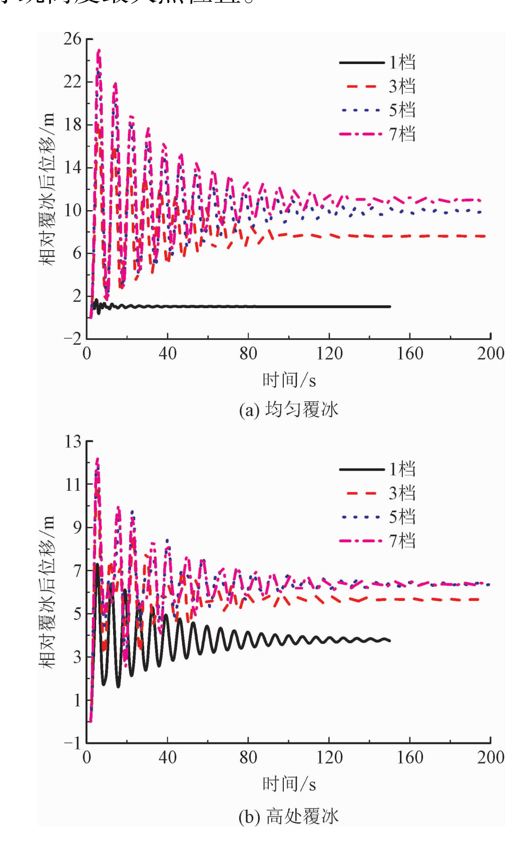


图 14 不同档数时导线脱冰跳跃最高点位移时程

Fig. 14 The time history curve of the highest point of conductor ice-shedding jump under different spans

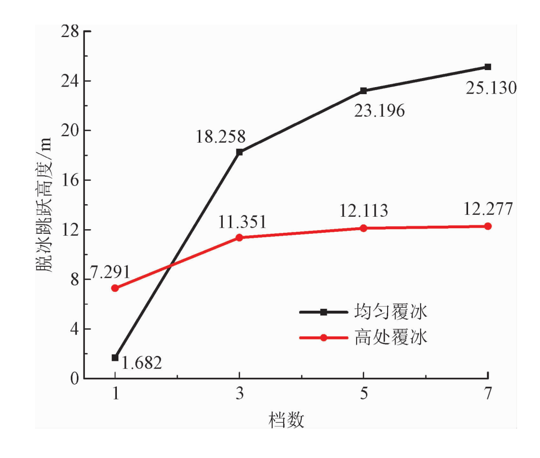


图 15 不同档数时导线冰跳高度

Fig. 15 Ice-shedding jump height in different number spans

表 8　高处覆冰下不同档数时冰跳高度最大点位置

Tab. 8　The position of the maximum ice-shedding jump height point in different spans

档数	1	3	5	7
最大脱冰跳跃点距高挂点距离/m	183	244	245	250

从图 14 和图 15 可以看出，两种覆冰形式下脱冰跳跃高度均随着档数的增多而增大，当档数为 1 即为孤立档时脱冰跳跃高度较小；档数大于 1 时，均匀覆冰下脱冰跳跃高度随档数增大的趋势减缓，高处覆冰下脱冰跳跃高度随档数的变化很小。由表 7 可知，孤立档时高处覆冰工况下导线脱冰跳跃高度最大点的位置相较于其他档数更靠近高挂点，除孤立档外档数变化对冰跳高度最大点的位置影响很小。均匀覆冰工况下，输电线路设计可通过减少耐张段档数来低冰跳高度，以减少事故的发生；高处覆冰工况下，应重点关注高挂点附近导地线之间是否满足电气安全间隙要求。

3.2　档距的影响

计算不同档距对中间档导线脱冰后动力响应的影响。计算工况同 2.2 节。图 16 和图 17 分别给出了两种覆冰形式下导线冰跳高度随中间档档距和两侧档档距变化的规律。

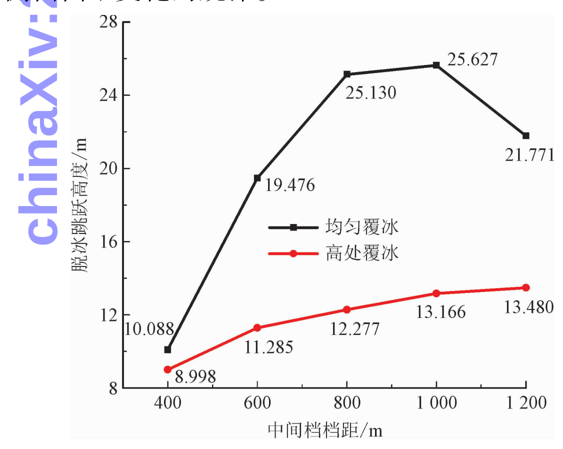


图 16　中间档档距不同时导线冰跳高度

Fig. 16　Ice-shedding jump height with different middle span length

由图 16 可知，随着中间档档距增大，均匀覆冰工况下导线的脱冰跳跃高度先增大再减小，在档距较大时，脱冰跳跃高度有趋于饱和的趋势，随着档距的增大变化不大，档距继续增大时，脱冰跳跃高度减小，当档距为 1 000 m 时，脱冰跳跃高度最大，分析此峰值存在是因为档距增大时，导线张力的垂直分量逐渐增大，将会阻碍导线向上跳跃。高处覆冰工况下，脱冰跳跃高度随着档距增大逐渐增大，由于高处覆冰工况下导线仅在距离高挂点 300 m 内覆冰，此时档距增大仅使脱冰跳跃高度减小，并未出现峰值脱冰跳跃高度。

根据图 16 所示的规律，可以得出结论，均匀覆冰时在导线冰跳高度饱和区域之前，减小档距可以降低冰跳高度；在冰跳高度饱和区域内，改变档距不能明显减小导线的跳跃高度。

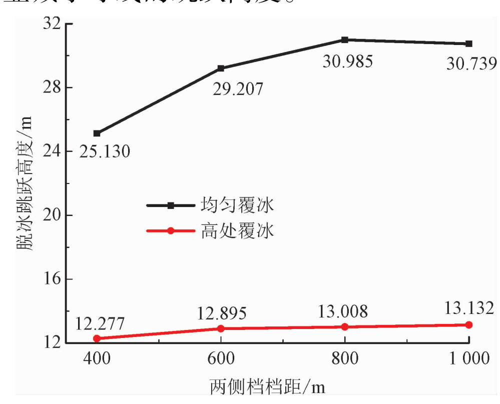


图 17　两侧档档距不同时导线冰跳高度

Fig. 17　Ice-shedding jump height with different span of both sides

由图 17 可以看出，两种覆冰形式下的脱冰跳跃高度随两侧档档距的增大先增大再趋于不变。均匀覆冰工况下两侧档距为 800 m 时脱冰跳跃高度达到峰值，高处覆冰下两侧档距为 1 000 m 时脱冰跳跃高度最大。可认为在中间档档距不变时，两侧档档距与中间档档距相等时，中间档导线的脱冰跳跃高度最大。

表 9 给出了高处覆冰时脱冰跳跃高度最大点的位置，可以看出，随着中间档档距的增大，脱冰跳跃高度最大点的位置向高挂点移动，改变两侧档档距对脱冰跳跃高度最大点的位置几乎无影响。

表 9　高处覆冰下档距不同时冰跳高度最大点位置

Tab. 9　The position of the maximum ice-shedding jump height point in different span length

工况	1	2	3	4	5	6	7	8
最大脱冰跳跃点距高挂点距离/m	200	262	250	241	236	250	250	248

3.3　高差的影响

计算高差不同对中间档导线脱冰后动力响应的影响。计算工况同 2.3 节。图 18 和图 19 分别为 2 种覆冰形式下导线冰跳高度随中间档高差和随两侧档高差变化的规律。

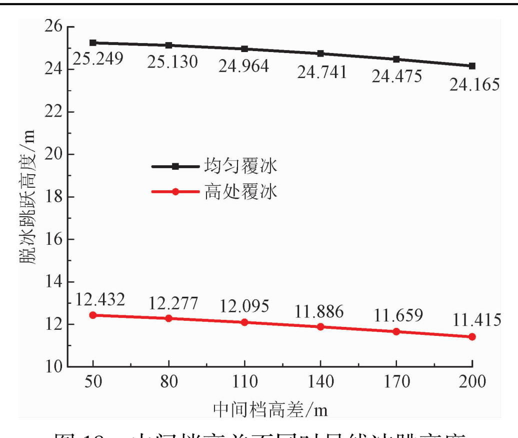


图 18 中间档高差不同时导线冰跳高度

Fig. 18 Ice-shedding jump height with different elevation difference of the middle span

由图18可知，随着中间档高差的增大，两种覆冰形式下的脱冰跳跃高度均减小，但减小的幅度较小，分析此现象产生的原因是高差越大，导线的松弛度越小，张力的竖直分量更大，对导线跳跃的阻碍更大。

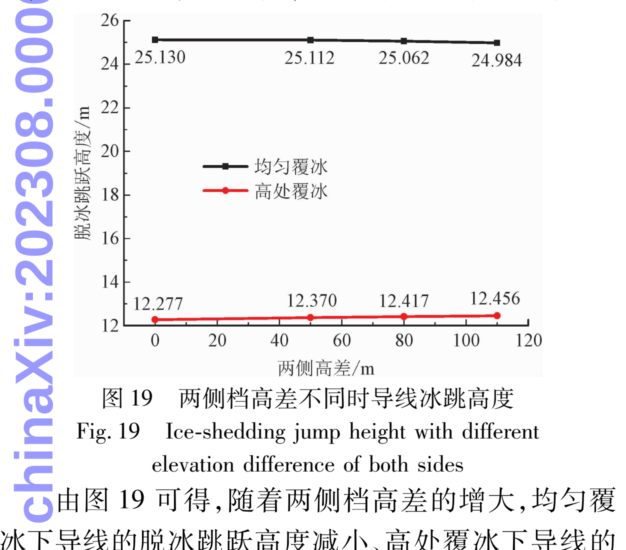


图 19 两侧档高差不同时导线冰跳高度

Fig. 19 Ice-shedding jump height with different elevation difference of both sides

由图19可得，随着两侧档高差的增大，均匀覆冰下导线的脱冰跳跃高度减小、高处覆冰下导线的脱冰跳跃高度增大，但变化幅度很小，可认为两侧高差的改变对导线冰跳高度无影响。

表10为高处覆冰时脱冰跳跃高度最大点位置，可以看出，高差的改变对脱冰跳跃高度最大点的位置影响很小。

表 10 高处覆冰下高差不同时冰跳高度最大点位置

Tab. 10 The position of the maximum ice-shedding jump height point in different elevation difference

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9
最大脱冰跳跃点距高挂点距离/m	250	250	249	249	250	250	250	249	249

3.4 覆冰厚度的影响

计算覆冰厚度分别为10、15、20、25、30 mm，中间档导线脱冰后的动力响应。图20为两种覆冰形式下导线冰跳高度随覆冰厚度的变化规律。

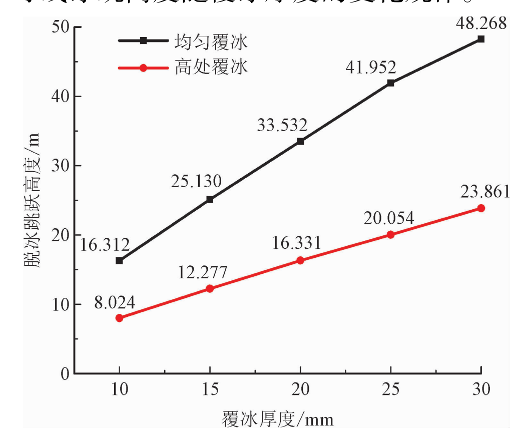


图 20 覆冰厚度不同时导线冰跳高度

Fig. 20 Ice-shedding jump height with different icing thickness

由图20可知，随覆冰厚度增大导线脱冰动力响应也增大，两种覆冰形式下导线的冰跳高度增加明显。

表11给出了高处覆冰时脱冰跳跃高度最大点位置，可以看出，覆冰厚度的改变对脱冰跳跃高度最大点的位置影响很小。

表 11 高处覆冰下覆冰厚度不同时冰跳高度最大点位置

Tab. 11 The position of the maximum ice-shedding jump height point in different icing thickness

覆冰厚度/mm	10	15	20	25	30
最大脱冰跳跃点距高挂点距离/m	242	250	250	257	253

3.5 脱冰率的影响

本节计算脱冰率为50%、60%、70%、80%、100%时，中间档导线脱冰后的动力响应。图21为两种覆冰形式下导线的冰跳高度随覆冰厚度的变化规律。

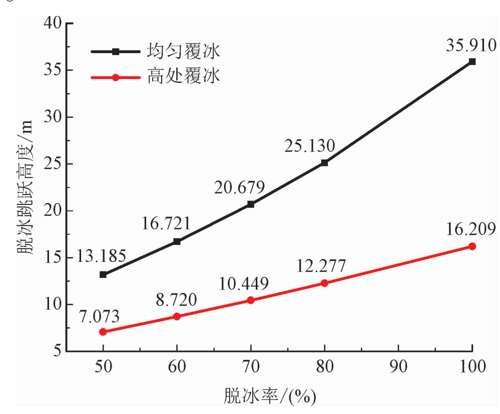


图 21 脱冰率不同时导线冰跳高度

Fig. 21 Ice-shedding jump height with different ice-shedding rate

由图 21 可知,随着脱冰率的增大,两种覆冰形式下导线脱冰的动力响应增大,脱冰跳跃高度均增大。

表 12 给出了高处覆冰时脱冰跳跃高度最大点位置,可知,脱冰率的改变对脱冰跳跃高度最大点的位置几乎无影响。

表 12　高处覆冰下脱冰率不同时冰跳高度最大点位置

Tab. 12　The position of the maximum ice-shedding jump height point in different ice-shedding rate

脱冰率	50%	60%	70%	80%	100%
最大脱冰跳跃点距高挂点距离/m	249	250	250	250	247

4　结　论

本研究采用有限元方法对连续档绝缘子串-分裂导线模型进行覆冰静力和脱冰动力计算,分析不同影响因素下,导线覆冰形态和脱冰跳跃响应的变化规律,得到以下结论。

1)高处覆冰工况下,导线向高挂点一侧的水平偏移和向下竖直位移均随着档数、档距、高差和覆冰厚度的增大而增大,其中两侧档高差的增大对导线的位移值几乎无影响。

2)高处覆冰下,导线的脱冰跳跃高度随着档数、档距、覆冰厚度和脱冰率的增大而增大,高差的变化对其影响很小,本研究研究的 300 m 覆冰长度时冰跳高度最大点的位置均在距高挂点 250 m 左右,设计中需要重视高挂点附近的间距校验。

3)均匀覆冰下,导线的脱冰跳跃高度随着档数、覆冰厚度和脱冰率的增大而增大,随着高差的增大而减小,但影响幅度很小,中间档档距为 1 000 m 时,导线脱冰跳跃高度出现峰值,为 25.627 m,在档距较大时,脱冰跳跃高度有趋于饱和的趋势。

4)高处覆冰下由于导线的纵向滑移极易导致导地线间距在高悬挂点附近间距不足,设计中应重视此种情况下的间距校验,工程设计中可以通过采用耐-耐方式、减少耐张段内档数、减小档距、合理加大导地线或导线与导线之间的间距等方式来降低覆冰脱冰事故的概率。

参考文献:

[1]　王少华. 输电线路典型覆冰事故及防治技术分析[J]. 高压电器,2010,46(10):85-89.
WANG Shaohua. Analysis of typical ice accidents of transmission lines and preventing techniques[J]. High voltage apparatus,2010,46(10):85-89(in Chinese).

[2]　张健,李小亭,张博,等. 新疆地区 750kV 线路覆冰与脱冰事故分析[J]. 浙江电力,2020,39(10):58-62.
ZHANG Jian,LI Xiaoting,ZHANG Bo,et al. Analysis of icing and ice shedding failures on 750 kV transmission lines in Xinjiang[J]. Zhejiang electric power,2020,39(10):58-62(in Chinese).

[3]　JAMALEDDINE A,MCCLURE G,ROUSSELET J,et al. Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using adina[J]. Computers & structures,1993,47(4/5):523-536.

[4]　李宏男,吴育炎. 输电线路覆冰脱落动力效应试验研究[J]. 土木工程学报,2019,52(5):35-46.
LI Hongnan,WU Yuyan. Experimental study on dynamic responses of transmission lines caused by ice shedding[J]. China civil engineering journal,2019,52(5):35-46(in Chinese).

[5]　MENG X B,WANG L M,HOU L,et al. Dynamic characteristic of ice-shedding on UHV overhead transmission lines[J]. Cold regions science and technology,2011,66(1):44-52.

[6]　杜志叶,张宇,阮江军,等. 500kV 架空输电线路覆冰失效有限元仿真分析[J]. 高电压技术,2012,38(9):2430-2436.
DU Zhiye,ZHANG Yu,RUAN Jiangjun,et al. Failure analysis of 500 kV iced overhead transmission line by finite element method[J]. High voltage engineering,2012,38(9):2430-2436(in Chinese).

[7]　薛凯允. 架空输电线路覆冰脱落后的动力响应分析[D]. 太原:中北大学,2019.

[8]　ROSHAN FEKR M,MCCLURE G. Numerical modelling of the dynamic response of ice-shedding on electrical transmission lines[J]. Atmospheric research,1998,46(1/2):1-11.

[9]　董永星,武怡帆,芮晓明,等. 分裂导线不同步脱冰动力响应研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2018,45(1):86-91.
DONG Yongxing,WU Yifan,RUI Xiaoming,et al. Research on dynamic response of bundled conductor after non-synchronous ice shedding[J]. Journal of North China Electric Power University (natural science edition),2018,45(1):86-91(in Chinese).

[10]　陈科全. 覆冰输电线路脱冰动力响应及机械式除冰方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.

[11]　陈科全,严波,郭跃明,等. 超高压输电线脱冰动力响应数值模拟[J]. 重庆大学学报,2009,32(5):544-549.
CHEN Kequan,YAN Bo,GUO Yueming,et al. Dynamic responses of ultra-high voltage transmission line ice shedding[J]. Journal of Chongqing University,2009,32(5):544-549(in Chinese).

[12] ROSHAN FEKR M, MCCLURE G. Numerical modelling of the dynamic response of ice-shedding on electrical transmission lines[J]. Atmospheric research, 1998, 46(1/2): 1-11.

[13] 卞荣, 张跃龙, 刘伟军, 等. 风荷载对输电线路导线脱冰跳跃高度的影响[J]. 电工技术, 2020(7): 44-47.
BIAN Rong, ZHANG Yuelong, LIU Weijun, et al. Influence of wind load on jump height of conductor in transmission lines after ice-shedding[J]. Electric engineering, 2020(7): 44-47(in Chinese).

[14] 王德千, 严波, 黄桂灶, 等. 输电导线脱冰跳跃高度实用简化计算公式[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(2): 60-67.
WANG Deqian, YAN Bo, HUANG Guizao, et al. Simplified formula for jump height of transmission lines after ice-shedding[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(2): 60-67(in Chinese).

[15] 陈波, 宋欣欣, 吴镜泊. 输电塔线体系力学模型研究进展——第 29 届全国结构工程学术会议特邀报告[C]//第 29 届全国结构工程学术会议论文集(第 Ⅰ 册). 湖北武汉: 中国力学学会结构工程专业委员会, 2020: 27-46.

[16] 徐亮. 分裂导线间隔棒体系覆冰脱落的数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[17] 晏致涛, 李孟珠, 熊辉, 等. 考虑高差覆冰输电线路链式脱冰振动[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 115-121.
YAN Zhitao, LI Mengzhu, XIONG Hui, et al. Zippered deicing vibration of an iced transmission line considering altitude difference [J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2020, 47 (3): 115-121(in Chinese).

[18] 王黎明, 曹露, 高亚云, 等. 输电线路非均匀脱冰严重工况的规律[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2442-2449.
WANG Liming, CAO Lu, GAO Yayun, et al. Law of sever conditions of non-uniform ice-shedding jumping of transmission lines [J]. High voltage engineering, 2018, 44(8): 2442-2449(in Chinese).

[19] XIE X Z, WU Y J, LIANG K Y, et al. Experiment study on dynamic effects of tower-line systems induced by ice shedding[J]. Advances in civil engineering, 2020, 2020: 6241789.

[20] HUANG G Z, YAN B, WEN N, et al. Study on jump height of transmission lines after ice-shedding by reduced-scale modeling test [J]. Cold regions science and technology, 2019, 165: 102781.

[21] 薛凯允. 架空输电线路覆冰脱落后的动力响应分析[D]. 太原: 中北大学, 2019.

[22] 徐晓斌. 输电线覆冰脱冰的有限元模拟方法和动力效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[23] 白天明, 曹咏弘, 薛凯允, 等. 架空输电线路脱冰跳跃模拟试验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 136-141.
BAI Tianming, CAO Yonghong, XUE Kaiyun, et al. Research of simulated test on deicing jump of overhead transmission lines[J]. Journal of North University of China (natural science edition), 2020, 41(2): 136-141(in Chinese).

[24] MCCLURE G, JI Kunpeng, RUI Xiaoming. An integrated ice-shedding model of electric transmission lines with consideration of ice adhesive/cohesive failure[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics. [S. l.]: [s. n.], 2014: 3731-3736.

(编辑 张璐)